Diffraction d'une onde

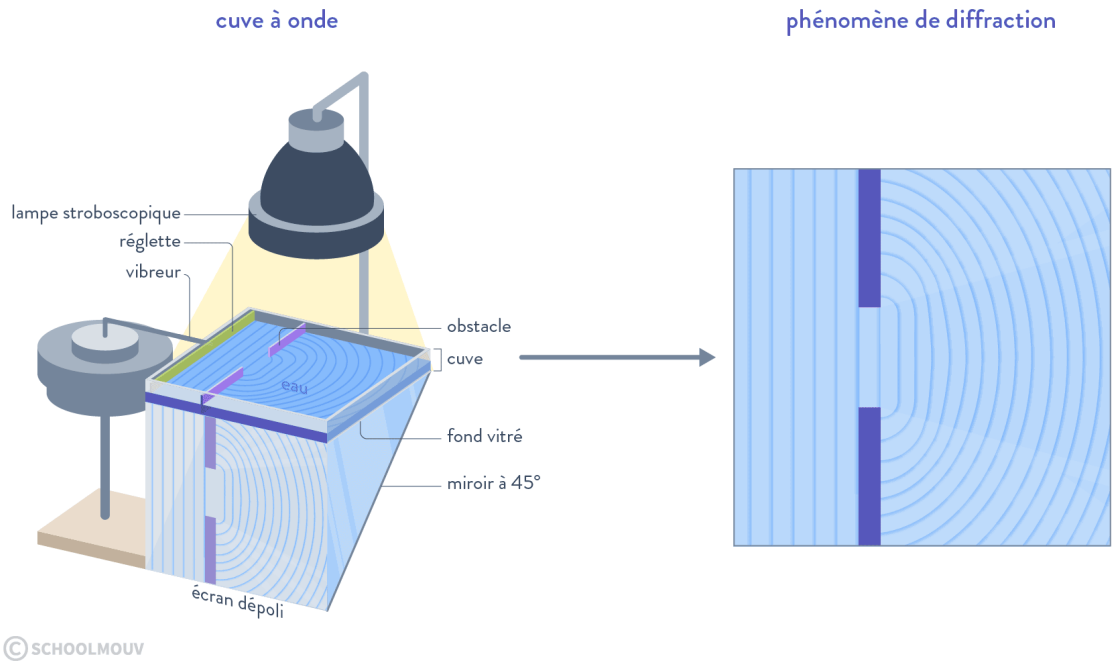
Introduction :

Les ondes sont des perturbations qui se propagent sans déplacement de matière, mais avec un transport d'énergie. Ces ondes ont des caractéristiques (longueur d'onde λ, fréquence f, vitesse c, période T) qui leurs sont propres et qui dépendent notamment de leur nature (électromagnétique ou mécanique). Cependant, parmi les caractéristiques des ondes, ce cours s'intéresse à ce qui se produit lorsqu'une onde heurte un obstacle. C'est le phénomène de diffraction de l'onde.
Ce cours présentera les caractéristiques du phénomène de diffraction des ondes, puis développera en détails la diffraction des ondes lumineuses et des ondes sonores.

1 Le phénomène physique de diffraction des ondes

a. Observation du phénomène de diffraction

Afin de mieux analyser la notion de diffraction d'une onde prenons l'exemple de la cuve à onde, qui permet de visualiser la formation et la propagation d'ondes à la surface d'un fluide.
Dans une cuve à onde, une règle verticale est reliée à un vibreur produisant ainsi des ondes progressives à la surface de l'eau. On place ensuite un obstacle pour observer la propagation de l'onde.



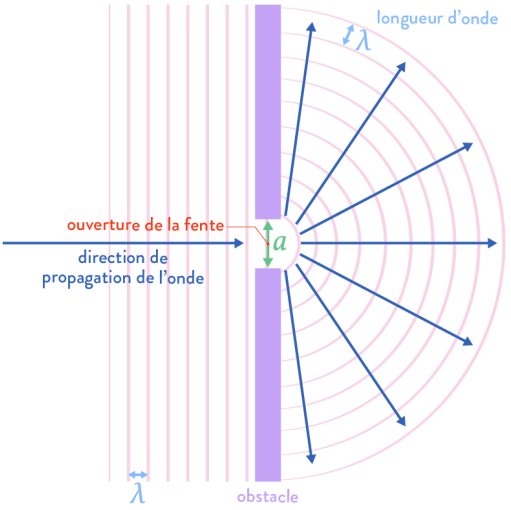
Nous observons qu'au passage de l'obstacle, la direction de propagation de l'onde change et devient circulaire, tout en continuant de se propager à la surface de l'eau.
De plus, nous remarquons que la longueur d'onde ne varie pas lorsque l'onde rencontre l'obstacle.

À retenir

Quand une onde électromagnétique (lumière, ondes radio...) ou mécanique (son, vague, onde sismique, etc.) rencontre un obstacle, sa direction de propagation peut varier sans que sa longueur d'onde λ, ni sa fréquence f ne changent, car ces deux grandeurs sont propres à la source et au milieu de propagation qui reste le même.

→ C'est le phénomène de **diffraction de l'onde**.

Phénomène de diffraction d'une onde



© SCHOOLMOUV

b. La diffraction

Définition

Diffraction :

Une onde subit une diffraction lorsqu'elle rencontre une ouverture ou un obstacle (cheveu, poussière...) provoquant un changement de sa direction de propagation.

À retenir

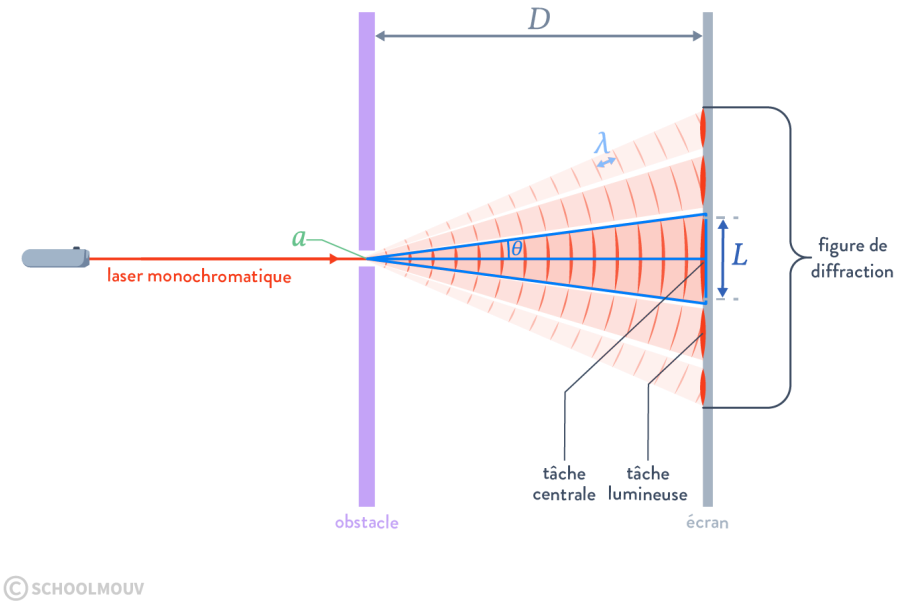
Une onde mécanique ne subit de diffraction que lorsque l'obstacle ou l'ouverture rencontré est du **même ordre de grandeur que la longueur d'onde** de l'onde.
La diffraction dépend de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ et de la taille d'ouverture a de l'obstacle.

Attention

> Ne pas confondre la diffraction et la réfraction qui est le changement de direction d'un faisceau lumineux lors d'un changement de milieu.

c. L'écart angulaire

Observons le schéma ci-dessous correspondant à la **diffraction d'une onde émise par un faisceau laser monochromatique** de longueur d'onde λ donnée. Devant le laser se trouve un obstacle ayant une fente de largeur a, après l'obstacle est placé un écran à une distance D, permettant d'observer la **figure de diffraction** d'une onde, que nous détaillerons dans la seconde partie de ce cours.



Lorsque le faisceau lumineux rencontre l'obstacle, le phénomène de diffraction se produit.

→ Ainsi, nous observons sur l'écran la figure de diffraction comportant des tâches lumineuses et une tâche centrale, séparées par des zones d'ombres. Cette figure est le résultat de la diffraction de l'onde.

Ici, nous allons nous intéresser à l'angle caractéristique de diffraction qui va nous permettre de quantifier la diffraction. Cet angle correspond à l'angle que fait le faisceau lumineux diffracté avec la droite passant par le milieu

de la fente. De fait, il correspond au demi-angle de la tâche centrale de diffraction. Cet angle se nomme **écart angulaire** θ de diffraction.

Définition

Écart angulaire :

L'écart angulaire θ est le demi-angle de la tâche centrale de diffraction. Il a pour expression :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Avec :

- θ l'écart angulaire en radian (rad) ;
- λ la longueur d'onde en mètre (m) ;
- a la taille de l'ouverture ou de l'objet en mètre (m).

Exemple

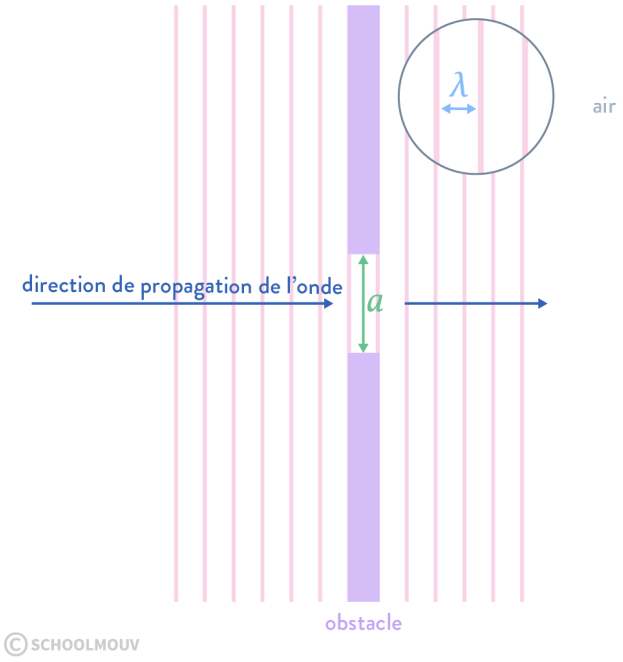
Est-ce qu'un faisceau laser rouge peut subir une diffraction s'il rencontre une fente de $1\ \mathrm{cm}$?

Le faisceau laser est une onde électromagnétique monochromatique de longueur d'onde $640\ \mathrm{nm}$. Nous allons vérifier que ces deux distances ont le même ordre de grandeur. Ainsi,

$$\begin{aligned}\lambda &= 640 \times 10^{-9} \times 10^{2} \\ &= 6,4 \times 10^{-5}\ \mathrm{cm}\end{aligned}$$

Nous observons alors que λ a un ordre de grandeur de $\times 10^{-5}\ \mathrm{cm}$ et a a un ordre de grandeur de $1\ \mathrm{cm}$.

→ Ces deux grandeurs n'ont pas le même ordre de grandeur, donc dans cette situation nous n'observons pas de diffraction.



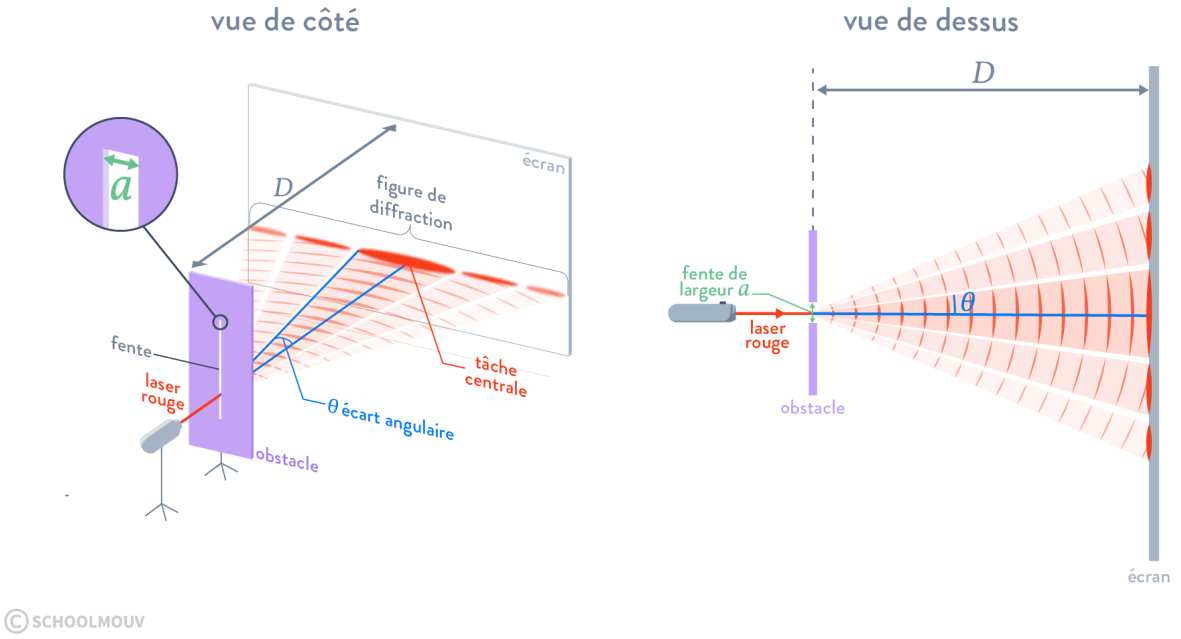
À retenir

Plus la dimension a de la fente ou de l'obstacle que rencontre l'onde est petite par rapport à la longueur d'onde λ de l'onde, plus l'onde sera diffractée, c'est-à-dire plus l'angle de diffraction θ sera important. Car $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$, donc θ est inversement proportionnel à a.

2 Diffraction d'une onde lumineuse

Une onde lumineuse visible est une **onde électromagnétique** de longueur d'onde λ comprise entre 350 et $750\ \mathrm{nm}$. Par conséquent, une onde lumineuse subit une diffraction quand elle rencontre un obstacle de même ordre de grandeur que sa longueur d'onde.

Reprenons le schéma de diffraction du faisceau laser monochromatique mais cette fois-ci de couleur rouge. En plaçant un écran après une fente verticale et longue sur la trajectoire du faisceau de lumière, on observe la **figure de diffraction** suivante :

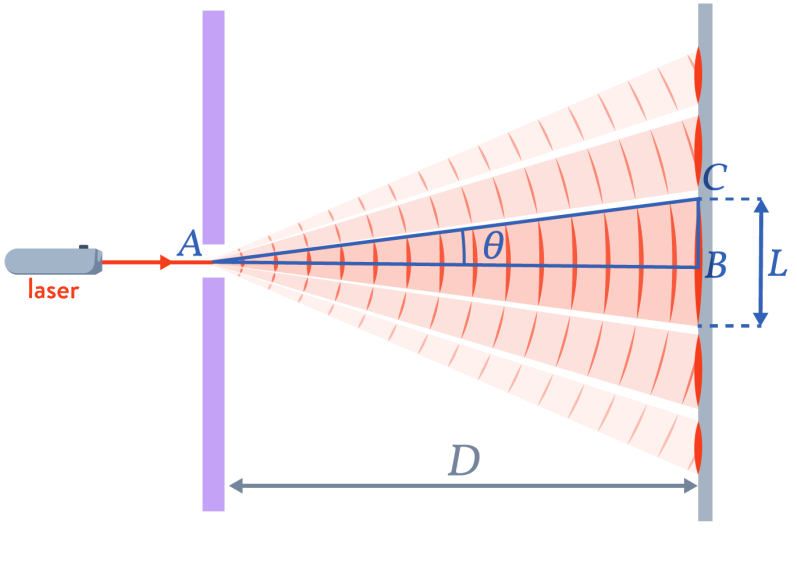


En se diffractant, le faisceau lumineux forme sur l'écran une succession de tâches lumineuses et de tâches sombres.

→ On observe également que la **tâche lumineuse centrale** a une plus grande intensité et est plus large que les autres.

À retenir

En observant le triangle rectangle ABC formé par l'onde lumineuse après son passage par la fente :



On peut calculer la **tangente de l'écart angulaire** θ, qui est l'angle que fait la normale avec le faisceau lumineux délimitant la tâche centrale :

$$\begin{aligned}\tan\theta &= \frac{\text{coté opposé}}{\text{coté adjacent}} \\ &= \frac{BC}{AB} \\ &= \frac{\frac{L}{2}}{D} \\ &= \boxed{\frac{L}{2D}}\end{aligned}$$

Avec :

- L le largeur de la tâche centrale, en mètre (m) ;
- D la distance entre l'obstacle et l'écran, en mètre (m).

Rappel

Pour les petits angles mesurés en radian, on peut écrire :

- $\tan\theta \approx \theta$
- $\sin\theta \approx \theta$
- $\cos\theta \approx 1$

Exemple

Un laser de couleur jaune est dirigé vers un obstacle d'ouverture a et de largeur égale à $4\ 000\ \mathrm{nm}$. Puis, un écran est placé à une distance D de $20\ \mathrm{cm}$ de l'obstacle.
De plus, le laser émet une onde lumineuse monochromatique jaune qui possède une longueur d'onde de $575\ \mathrm{nm}$.

Calculer la largeur L de la tâche centrale qu'on obtiendrait sur l'écran.

D'après la formule de la tangente de l'écart angulaire θ, nous avons :

$$\tan\theta = \frac{L}{2D}$$

Or θ est un petit angle, donc $\tan\theta \approx \theta$. Ainsi,

$$\theta = \frac{L}{2D}$$

Or,

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Alors,

$$\boxed{\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}}$$

Donc,

$$L = \frac{\lambda 2D}{a}$$

D'après l'énoncé, la longueur d'onde du laser est de $575\ \mathrm{nm}$. Soit,

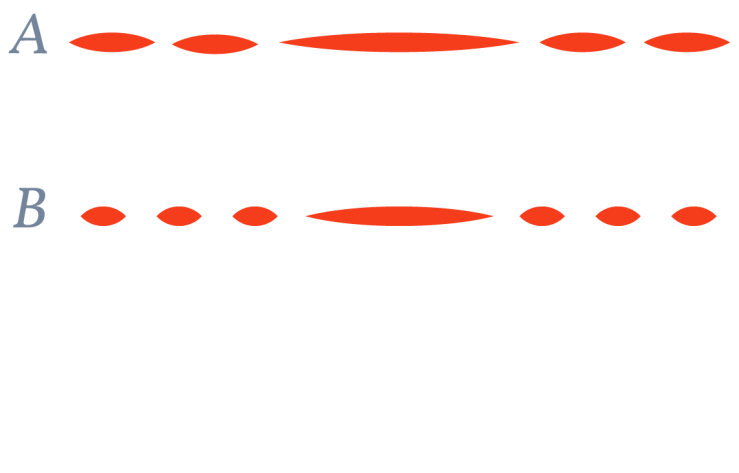
$$\begin{aligned} L &= \frac{\lambda 2D}{a} \\ &= \frac{575 \times 10^{-9} \times 2 \times 20 \times 10^{-2}}{4000 \times 10^{-9}} \\ &\approx 0,058\ \mathrm{m} \\ &\approx 5,8\ \mathrm{cm} \end{aligned}$$

Donc le diamètre L de la tâche centrale est de $5,8\ \mathrm{cm}$.

Exemple

Une onde lumineuse est diffractée par une fente 1 et par une fente 2. En sachant que la taille de la fente 1 est inférieure à celle de la taille 2.

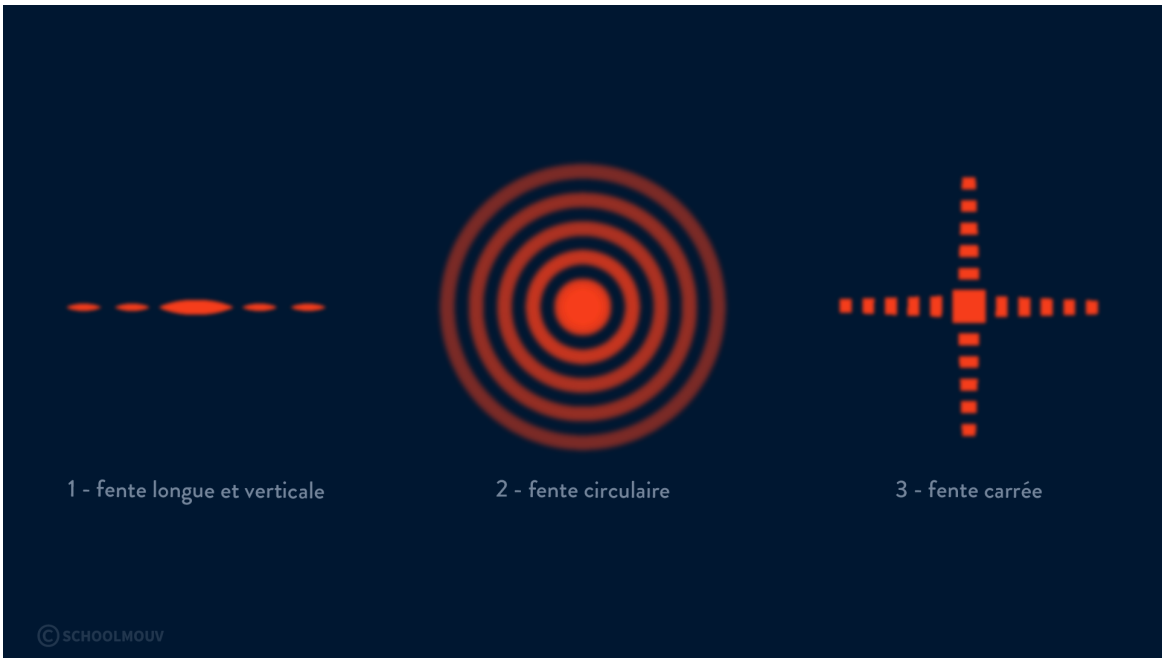
Identifiez la figure de diffraction ci-dessous attribuée au passage de l'onde par la fente 1.



La figure A présente une tâche centrale plus large. Or la taille de la fente s'exprime en fonction de la largeur de la tâche centrale par la relation : $L = \frac{\lambda 2D}{a}$.
La largeur de la tâche centrale L est donc inversement proportionnelle à la taille de la fente 1.

La figure de diffraction A est donc attribuée au passage de l'onde lumineuse par la fente 1.

Expérimentalement, la figure de diffraction d'une onde électromagnétique par une fente longue et verticale sera perpendiculaire à la fente et aura l'aspect de la figure 1. Lorsque la fente est circulaire, nous observons expérimentalement la figure 2. Enfin, la figure 3 représente la diffraction d'une onde à travers une fente carrée.



→ La figure de diffraction contient le motif de l'objet.

De plus, les figures de diffraction de deux obstacles complémentaires et de même largeur sont identiques, comme par exemple les figures de diffraction d'un cheveu et d'une fente longue et fine.

→ Comme nous pouvons l'observer sur les différentes fentes verticales vues ci-dessus, l'étalement se fait selon l'axe horizontal. Alors, la diffraction se déploie sur un axe perpendiculaire à l'axe de l'obstacle.

3 Diffraction d'une onde sonore

Une onde sonore audible est une **onde mécanique** dont la fréquence est comprise entre $20\ \mathrm{Hz}$ et $20\ \mathrm{KHz}$.

→ Par conséquent, une onde sonore subit le phénomène de diffraction quand elle rencontre un obstacle de dimension a de même ordre de grandeur que sa longueur d'onde.

Le son se propage dans l'air à une vitesse de $340\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ avec une fréquence f comprise entre $20\ \mathrm{Hz}$ et $20\ \mathrm{KHz}$. Alors, la longueur d'onde de ces ondes est comprise entre $17\ \mathrm{mm}$ et $17\ \mathrm{m}$, car :

- $\lambda_{\max} = \dfrac{c}{f} = \dfrac{340}{20} = 17\ \mathrm{m}$;

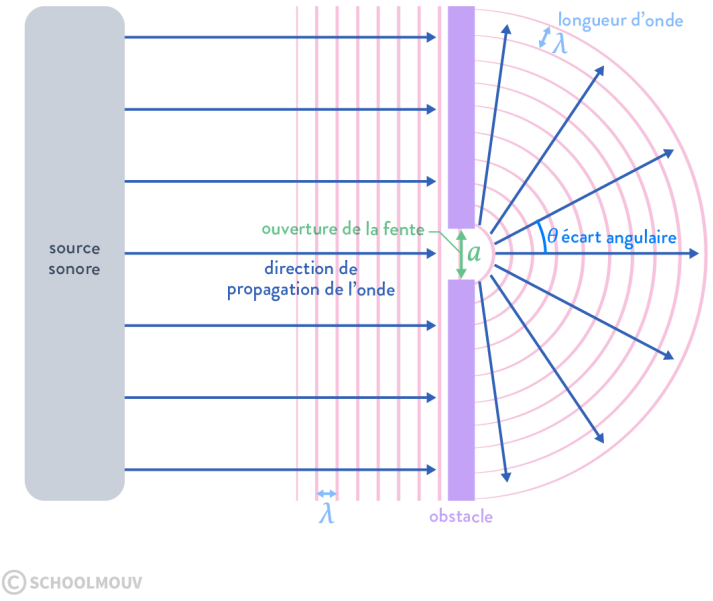
- $\lambda_{\text{min}} = \dfrac{c}{f} = \dfrac{340}{20 \times 10^3} = 17 \text{ mm}.$

→ Sachant que la longueur d'onde et la taille de l'obstacle doivent être obligatoirement du même ordre de grandeur pour qu'il y ait diffraction alors, la taille de l'obstacle doit être comprise entre 10 mm et 10 m (ordres de grandeur).

À retenir

> On peut donc dire que la dimension de l'obstacle sera bien plus grande pour les ondes sonores que pour les ondes lumineuses afin de pouvoir observer une diffraction.

Il n'y a pas de figure de diffraction observable dans le cas des ondes sonores mais on peut établir un schéma pour aider à la visualisation :



À retenir

> En se diffractant dans l'air, les ondes sonores planes deviennent circulaires après le passage de l'obstacle. La longueur d'onde, la fréquence et la vitesse de propagation restent quant à elles inchangées.

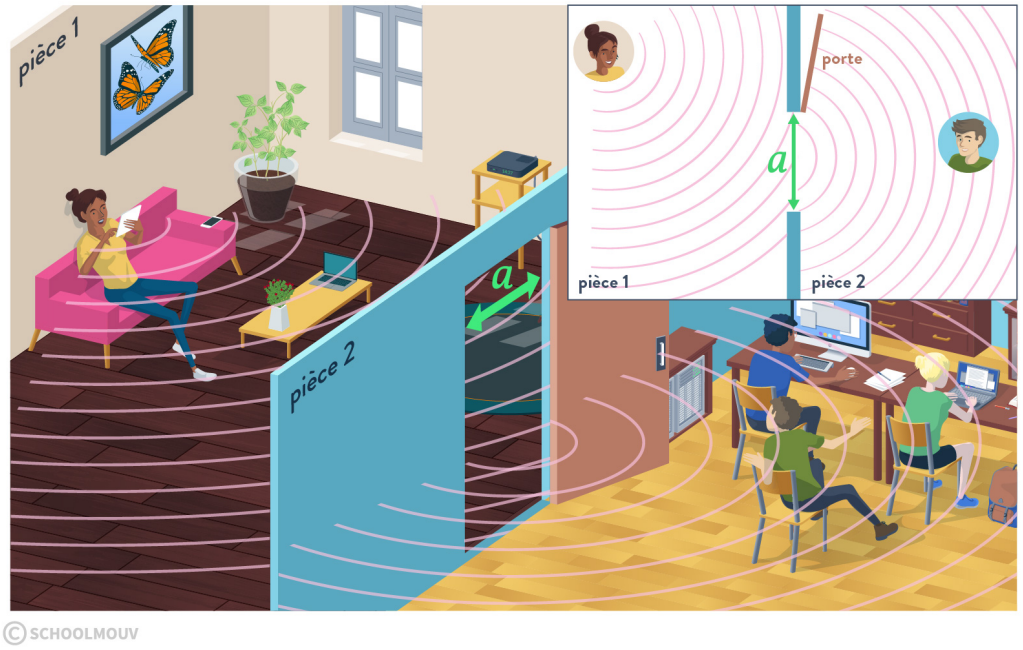
Exemple

Dans cet exemple nous allons démontrer comment une personne assise dans une pièce peut entendre une autre personne située dans une autre pièce, sachant que les deux pièces sont séparées par une porte ouverte de largeur $80\ \mathrm{cm}$.

On considère que la fréquence f de la conversation est de $300\ \mathrm{Hz}$ et que l'ouverture a de la porte fait $80\ \mathrm{cm}$.

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f}\\ &= \frac{340}{300}\\ &= 1,1\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

Ainsi l'ouverture de la porte est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des ondes sonores $(a < \lambda)$. Ces dernières subissent donc une diffraction par l'ouverture de la porte, et cela permet aux deux personnes de bien s'entendre.



Conclusion :

La diffraction est un phénomène physique naturel qui consiste à changer la direction de propagation des ondes mécaniques et électromagnétiques, après la rencontre de ces dernières avec un obstacle de taille proche ou inférieure à leur longueur d'onde. Ainsi, la dimension d'un obstacle pouvant diffracter une onde sonore audible est bien supérieure à celle d'un obstacle capable de diffracter une onde lumineuse visible.